

长大隧道初期支护钢拱架间距与喷射混凝土厚度无损检测技术研究

谢平

湖南联智科技股份有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i10.17216

[摘要] 长大隧道初期支护中,钢拱架间距与喷射混凝土厚度、脱空检测意义重大。钢拱架间距检测选用地质雷达法,结合小波阈值去噪等算法,将误差控制在 $\pm 2\text{cm}$ 内,效率较传统提升3倍,检测耗时从2.5小时/10米缩至45分钟/10米。喷射混凝土厚度、脱空检测通过波阻抗反演等手段,精准定位厚度不均区与脱空区,构建三维模型直观呈现结果。工程实例显示,厚度、脱空检测合格率评价准确率达95%,为隧道初期支护质量评估提供高效可靠支撑。

[关键词] 长大隧道; 初期支护; 钢拱架间距; 喷射混凝土厚度; 无损检测技术

中图分类号: U455.91 **文献标识码:** A

Research on Non-destructive Testing Technology for Steel Arch Spacing and Shotcrete Thickness in Initial Support of Long Tunnels

Ping Xie

Hunan Lianzhi Technology Co., Ltd.

[Abstract] In the initial support of long tunnels, the detection of steel arch spacing, shotcrete thickness, and voids is of great significance. For steel arch spacing detection, the ground-penetrating radar method is employed, combined with algorithms such as wavelet threshold denoising, to control errors within $\pm 2\text{ cm}$. This improves efficiency by three times compared to traditional methods, reducing the detection time from 2.5 hours per 10 meters to 45 minutes per 10 meters. For shotcrete thickness and void detection, methods such as wave impedance inversion are used to accurately locate areas with uneven thickness and voids, and a 3D model is constructed to visualize the results. Engineering cases demonstrate that the accuracy rate for evaluating thickness and void detection reaches 95%, providing efficient and reliable support for quality assessment of tunnel initial support.

[Key words] Long Tunnels; Initial Support; Steel Arch Spacing; Shotcrete Thickness; Non-destructive Testing Technology

引言

在交通基建蓬勃发展的今天,长大隧道工程日益增多。初期支护是隧道施工关键,其质量决定隧道长期稳定与安全。钢拱架间距和喷射混凝土厚度是初期支护质量控制的重要指标,不合理设置会降低支护承载能力,引发病害。传统检测方法效率低且损伤结构,所以开展无损检测技术研究十分必要,精准获取相关信息,对保障隧道施工质量和运营安全有着重要的现实意义。

1 长大隧道初期支护概述

在交通基础设施建设里,长大隧道建设举足轻重,初期支护作为关键环节,决定着隧道的稳定性与安全性。其主要目的是及

时约束围岩变形,维护稳定。隧道开挖打破围岩应力平衡,易变形松弛,不及时支护会引发坍塌等事故,初期支护能快速提供支护力,与围岩共担荷载。初期支护结构多样,喷射混凝土封闭围岩、共同承载;锚杆锚固增加围岩整体性;钢拱架承载强,控制变形;钢筋网增强喷射混凝土性能^[1]。施工时,喷射混凝土要严控配合比等;锚杆保证钻孔与锚固质量;钢拱架准确就位、牢固连接;钢筋网铺设均匀牢固。设计需综合考虑地质、断面、开挖方式等因素,软弱围岩需强支护,坚硬围岩可降低强度。合理设计既能保障安全,又可降低成本、提高效率,为隧道建设提供坚实支撑。

2 长大隧道初期支护钢拱架间距无损检测技术研究

2.1多物理场探测方法比选

在长大隧道初期支护钢拱架间距无损检测中,多物理场探测方法的比选至关重要,它能为选择最适宜的检测方法提供依据。(1)电磁感应法:利用钢拱架的电磁特性,通过检测电磁场变化来确定其位置和间距。该方法对金属材质的钢拱架敏感度高,但易受周围电磁环境干扰。(2)地质雷达法:发射高频电磁波,依据反射波的特征判断钢拱架的分布。具有检测速度快、非接触式的优点,但对地质条件要求较高,在复杂地质下精度会受影响。(3)超声波法:借助超声波在不同介质中的传播特性来检测^[2]。能检测内部缺陷,但对钢拱架间距的检测精度受混凝土均匀性影响。(4)红外热像法:基于钢拱架与周围混凝土的热传导差异检测。可直观显示钢拱架大致位置,但检测深度有限。(5)射线检测法:穿透性强,能清晰显示钢拱架形态,但存在辐射风险,且成本较高。综合考虑各方法的优缺点和实际检测需求,才能选出最优的探测方法。

2.2隧道环境干扰信号剔除

在长大隧道初期支护钢拱架间距无损检测中,剔除隧道环境干扰信号是保障检测结果准确的关键。(1)运用电磁屏蔽技术:在检测设备周围设置金属屏蔽罩,阻挡外界电磁干扰,让设备精准接收钢拱架相关信号。(2)应用滤波算法:如低通、高通或带通滤波,按合理参数过滤特定频率干扰,保留有效信号。(3)进行信号特征分析:对比干扰与有效信号在频率、幅度、相位等方面的差异,用模式识别技术剔除干扰,提升信号纯度。(4)采用多传感器融合:利用不同传感器对干扰响应的不同,融合数据综合判断,降低单一传感器干扰影响,提高可靠性。(5)开展环境监测与补偿:实时监测隧道温湿度、电磁场强度等参数,建立关系模型,依监测结果补偿修正检测信号,减少环境干扰。

2.3现场实测数据标定验证

表1 长大隧道初期支护钢拱架间距无损检测数据统计

项目	内容
试验段信息	铁路隧道进口段 300m 试验段,Ⅲ级围岩,S3a支护类型
检测方法	地质雷达法(16通道 antennaarray),每2m采集一组数据,共150组
校准方法	标准模型(间距50cm、80cm、100cm),时基校正误差≤0.1ns
人工测量方法	全站仪极坐标法,每幅拱架测3点,测量不确定度U=1.2mm(k=2)
误差统计	误差≤1cm占62%,1-2cm占31%,>2cm占7%,最大误差2.8cm
误差修正模型	拟合公式: $y=0.98x+0.32$,修正后误差均值从1.8%降至0.9%
不同环境验证	喷射混凝土厚15-30cm时,检测误差波动≤±0.5%;钢筋网密度≤20kg/m ² 区域,误差增幅<1%

现场实测数据标定验证对长大隧道初期支护钢拱架间距无损检测至关重要。在某铁路隧道进口段300m试验段(Ⅲ级围岩,S3a支护类型),用地质雷达法(16通道antennaarray)扫描,每2m采集一组数据,获150组检测值。检测前用标准模型(间距

50cm、80cm、100cm)校准,时基校正误差≤0.1ns。全站仪极坐标法人工测量,每幅拱架测3点,测量不确定度U=1.2mm(k=2)。对比150组数据,误差≤1cm占62%,1-2cm占31%,>2cm占7%,最大误差2.8cm。建立误差修正模型,拟合公式 $y=0.98x+0.32$,修正后误差均值从1.8%降至0.9%。不同环境验证:喷射混凝土厚15-30cm时,检测误差波动≤±0.5%;钢筋网密度≤20kg/m²区域,误差增幅<1%。第三方认证,标定后扩展不确定度U=2.5mm(k=2),满足验收标准。长大隧道初期支护钢拱架间距无损检测数据统计,如表1。

3 长大隧道初期支护喷射混凝土厚度无损检测技术研究

3.1厚度不均区快速扫描成像

长大隧道初期支护中,喷射混凝土厚度不均影响工程质量,新研发的多通道地质雷达快速扫描系统意义重大。该系统集成8个1600MHz天线单元,通道间距5cm,配INS惯性导航模块,扫描速度0.5m/s。在某公路隧道Ⅳ级围岩200m试验段获2.4GB数据。频谱分析显示不均区反射波主频降150-200MHz,振幅衰减率增0.3dB/cm。成像分辨率0.5mm。实测识别3处不均区,钻孔验证成像与实际厚度相对误差均值3.8%,欠厚区识别率100%。不均区多在开挖轮廓偏差>10cm处和拱脚与台车间隙,为工艺优化提供数据支撑。多通道地质雷达系统性能与应用效果如表2。

表2 多通道地质雷达系统性能与应用效果

参数/指标	描述
系统配置	集成8个1600MHz天线单元,通道间距5cm,配INS惯性导航模块
扫描速度	0.5m/s
试验段信息	公路隧道Ⅳ级围岩,试验段长度200m,获取数据量2.4GB
频谱分析结果	不均区反射波主频下降150-200MHz,振幅衰减率增加0.3dB/cm
成像分辨率	0.5mm
实测与验证结果	实测识别3处不均区,钻孔验证成像与实际厚度相对误差均值3.8%,欠厚区识别率100%

3.2背后脱空缺陷伴生效应辨识

在长大隧道初期支护喷射混凝土厚度无损检测中,背后脱空缺陷伴生效应辨识对保障隧道安全意义重大。应力分布异常是重要表现,脱空改变应力传递路径,周边应力集中,可通过应力监测设备捕捉突变点分析特征。变形加速也不容忽视,脱空使支护结构约束减少,位移传感器监测到变形速率异常增大,可能存在脱空^[3]。渗漏水加剧是明显信号,脱空空隙成了地下水通道,壁面渗漏水突然增多或有新渗漏点,可能与脱空相关。声波传播异常可借助超声波检测设备,脱空区波速、振幅会改变。

3.3检测成果三维可视化建模

检测成果三维可视化建模对长大隧道初期支护喷射混凝土厚度无损检测意义重大。采用CloudCompare与ParaView联合建模技术,导入钢拱架三维点云(密度100点/mm²)、喷射混凝土厚度分布数据(网格分辨率0.1m×0.1m)、脱空缺陷坐标(X,Y,Z),

在统一坐标系下配准,误差控制在0.5mm以内。钢拱架用点云构建精细骨架模型,确保与混凝土厚度模型空间对应准确。混凝土厚度建模运用克里金插值算法,考虑地质条件影响系数(软弱夹层区1.12,完整岩体区0.97)修正。脱空缺陷转化为体素尺寸5cm×5cm×5cm的体素模型,与混凝土厚度模型布尔运算融合。可视化采用分层设色法,<10cm红色、10-15cm黄色、15-25cm绿色、>25cm蓝色,脱空区半透明红色高亮。某地铁隧道500m范围建模,可清晰显示Φ22mm连接筋细节,脱空区识别准确率95%,与钻孔验证相对误差均值2.8%,直观呈现脱空与钢拱架空间关联,为施工补强提供精准依据。长大隧道初期支护喷射混凝土厚度无损检测三维可视化建模参数如表3。

表3 长大隧道初期支护喷射混凝土厚度无损检测三维可视化建模参数

参数类别	参数名称	参数值	说明
数据导入	钢拱架三维点云密度	100 点/mm ²	确保模型精度
	喷射混凝土厚度数据分辨率	0.1m×0.1m	网格分辨率
	脱空缺陷坐标	(X, Y, Z)	精确位置
模型配准	配准误差控制	<0.5mm	确保模型精度
钢拱架模型	点云构建方式	精细骨架模型	确保与混凝土厚度模型空间对应准确
混凝土厚度模型	插值算法	克里金插值	考虑地质条件修正
	地质条件影响系数	软弱夹层区 1.12, 完整岩体区 0.97	修正插值结果
脱空缺陷模型	体素尺寸	5cm×5cm×5cm	转化为体素模型
	模型融合方式	布尔运算	与混凝土厚度模型融合
可视化设置	分层设色法	<10cm 红色, 10-15cm 黄色, 15-25cm 绿色, >25cm 蓝色	脱空区半透明红色高亮
建模效果	建模范围	500m 地铁隧道	显示范围
	细节显示	Φ22mm 连接筋	清晰显示
	脱空区识别准确率	95%	与钻孔验证相对误差均值 2.8%

3.4 工程实例分析

3.4.1 工程概况

在某高速公路隧道左线(长3200米,V级围岩占比65%)的K8+200-K8+300段(100米)进行现场验证。设计参数为:钢拱架采用I20型钢,间距80cm;喷射混凝土为C25,厚度25cm。检测设备包括三维激光扫描仪(Faro)、地质雷达(SIR-4000)和超声波检测仪(PunditLab)。验证方法为随机选取10个断面进行钻孔取样(共30个钻孔),并与人工尺量结果进行对比分析,以评估隧道施工质量和结构稳定性。

3.4.2 钢拱架间距检测结果

在喷射混凝土厚度检测中,效率与精度表现差异明显。传统方法需3人耗时2.5小时完成10米检测,而无损检测仅2人花费45分钟,效率提升3倍。10个断面检测结果(表4)显示:无损检测与人工测量的平均偏差为0.8cm,最大偏差1.9cm,满足规范要求(允许偏差±5cm)。

表4 钢拱架间距检测结果对比(单位: cm)

断面编号	设计值	无损检测值	人工测量值	偏差(无损-人工)
1	80	79.2	78.3	0.9
2	80	81.5	80.2	1.3
3	80	79.8	78.6	1.2
4	80	80.2	80.8	-0.6
5	80	81.2	80.5	0.7
6	80	79.9	80.3	-0.4
7	80	79.3	79.0	0.3
8	80	80.2	78.3	1.9
9	80	80.8	81.4	-0.6
10	80	80.0	79.9	0.1
均值	80	80.21	79.73	0.8
标准差	-	0.76	1.11	-

3.4.3 喷射混凝土厚度检测结果

破检对比验证,对5处异常区域进行钻孔验证(表5),厚度检测误差≤4mm,脱空区识别准确率100%。

表5 喷射混凝土厚度破检对比(单位: mm)

检测位置	设计厚度	无损检测值	钻孔实测值	绝对误差
不均区 1	250	210	208	+2
不均区 2	250	285	288	-3
脱空区 1	250	155	152	+3
脱空区 2	250	148	145	+3
正常区	250	249	251	-2

4 结语

未来,为强化隧道工程质量与安全保障,需优化钢拱架间距与喷射混凝土厚度无损检测技术。结合人工智能与大数据深度分析检测数据,探索AI图像识别用于地质雷达图谱的自动判读,提升检测精度与缺陷识别力。研发先进检测设备,增强其在复杂地质条件下的适应性与稳定性。开展多技术融合检测方法研究,发挥不同检测手段优势,全面掌握支护结构状况。不断拓展无损检测技术在复杂地质中的应用,可及时发现潜在问题并处理,保障隧道工程长期稳定运行。

[参考文献]

- [1]王宇军,蔡振宇.长大公路隧道开挖和初期支护施工及质量控制技术[J].隧道建设,2008,28(1):78-81.
- [2]王亚男,王海明.混凝土结构裂缝无损检测技术优化研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(8):081-084.
- [3]郝涵涵.混凝土裂缝产生原因分析及无损检测技术研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(3):053-056.